

УДК 551.24.02:551.243

НЕКОТОРЫЕ ПРИЧИНЫ ТРУДНОСТЕЙ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ РЕШЕНИЯ

© 2020 г. Академик РАН В. Г. Бондур¹, М. Б. Гохберг^{1,2}, И. А. Гарагаш^{1,2}, Д. А. Алексеев^{1,2,3,4,*}

Поступило 14.09.2020 г.
После доработки 21.09.2020 г.
Принято к публикации 21.09.2020 г.

Обсуждаются причины недостаточной эффективности геодезического мониторинга, направленного на краткосрочный прогноз сильных землетрясений. На примере геомеханического мониторинга территории Южной Калифорнии показано, что деформации на земной поверхности оказываются существенно ниже таковых в более глубоких слоях земной коры, где происходит основная масса сейсмических событий, и не превышают фонового уровня. Предлагаются подходы, позволяющие проводить мониторинг глубинных деформаций с использованием детальных геомеханических моделей и методов дистанционного зондирования.

Ключевые слова: прогноз землетрясений, геомеханическая модель, напряженно-деформированное состояние, деформационные наблюдения, землетрясения, Южная Калифорния

DOI: 10.31857/S268673972012004X

Ситуация в области краткосрочного прогноза землетрясений обсуждалась различными авторами на протяжении длительного периода времени; при этом высказывались как оптимистические, так и пессимистические оценки относительно возможностей такого прогноза [11]. Отдельные публикации, хотя и весьма неполные, отмечают отсутствие удовлетворительных результатов в данном направлении и в самые последние годы [5]. При этом большинство подходов к выявлению предвестников землетрясений (при попытке краткосрочного прогноза) направлены на выделение некоторых (неочевидных, скрытых) закономерностей из большого ансамбля наблюдаемых данных (которые могут включать сейсмологические, геодезические, акустические, электромагнитные, атмосферно-химические и иные наблюдения). По существу, речь идет о задаче распознавания образов [14], занимающей центральное место в области популярных сегодня техник анализа с

использованием машинного обучения. Важно подчеркнуть, что в рамках такого подхода не учитывается конкретный физический механизм, стоящий за прогнозируемым явлением, и не дается количественного объяснения наблюдаемых распределений тех или иных параметров (полей, сигналов). Представляется, что в условиях относительно непродолжительной истории инструментальных наблюдений, отсутствие физической модели является серьезным недостатком такой концепции, а прогноз, получаемый в ее рамках с применением даже наиболее совершенных методов статистики и анализа, заведомо содержит элемент неопределенности, что подтверждается материалом наблюдений и соотношением предсказанных и не предсказанных событий.

Настоящее сообщение основано на 10-летнем опыте мониторинга напряженно-деформированного состояния, выполняемого с использованием детальной количественной геомеханической модели, построенной для региона Южной Калифорнии. Эта модель учитывает текущую слабую сейсмичность и дает возможность отслеживать динамику напряженно-деформированного состояния региона, что позволило выявить на временном горизонте 1–2 мес предвестники сильных ($M > 7$) сейсмических событий 2010 и 2019 г. [3, 4, 7, 8]. Следует сделать оговорку, что выводы, носящие достаточно общий характер, базируются именно на данных, полученных для сейсмоактивных провинций Южной Калифорнии и для дру-

¹ Научно-исследовательский институт "Аэрокосмос", Российская академия наук, Москва, Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, Российская академия наук, Москва, Россия

³ Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия

⁴ Институт океанологии им. П.П. Шишова, Российская академия наук, Москва, Россия

*E-mail: alexeevgeo@gmail.com

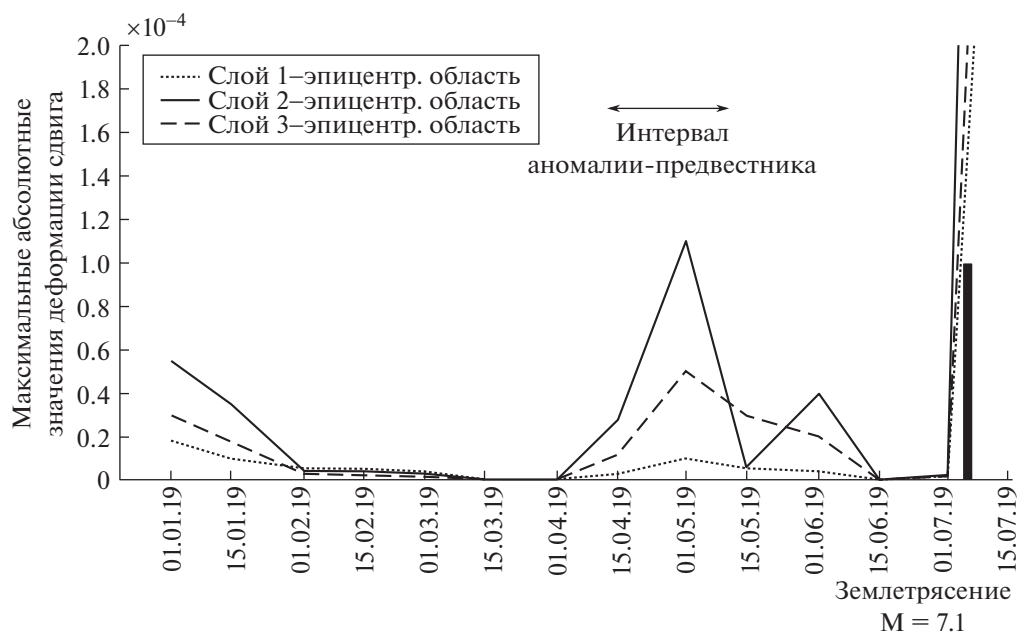


Рис. 1. Графики максимальных абсолютных значений деформации сдвига, рассчитанные для трех верхних слоев земной коры в пределах эпицентральной области события $M = 7.1$ 06.07.2019.

гих сейсмически опасных территорий, могут быть не столь категоричны.

Мотивацией работы явилось отсутствие в модельных данных сдвиговых деформаций, превышающих фоновые, в поверхностном слое земной коры перед землетрясением $M = 7.1$ в районе

г. Риджкrest 06.07.2019 во всей эпицентральной зоне (116.8° – 118.2° с.ш., 35° – 36° в.д.) [4, 8]. Расчет сдвиговых деформаций проводился в трех слоях верхней и средней земной коры (интервалы глубин 0–3, 3–7 и 7–15 км) в соответствии с выражением

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{6}[(\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})^2 + (\epsilon_{yy} - \epsilon_{zz})^2 + (\epsilon_{zz} - \epsilon_{xx})^2] + \epsilon_{xy}^2 + \epsilon_{yz}^2 + \epsilon_{zx}^2},$$

где ϵ_{ij} – компоненты тензора деформаций. Максимальные значения γ вычислялись в пределах эпицентральной области размером порядка 150×150 км. Установлено, что в период с середины апреля до начала июня 2019 г. зона аномальных значений сдвиговой деформации локализуется в непосредственной близости (20–30 км) от северо-западного крыла очага землетрясения.

Из рис. 1 следует, что аномальные значения сдвиговых деформаций, вызванных сейсмическим процессом за время около двух месяцев перед событием, приурочены к глубоким слоям на глубинах порядка 10 км и более. При этом деформации, обусловленные в модели процессами разрушения земной коры, в верхнем слое и на поверхности Земли имеют значения, не превосходящие фоновый уровень. Характерные пространственные размеры наблюдаемых зон сдвиговых деформаций в поверхностном слое составляют от первых километров до 10–15 км, что делает крайне сложным

их детектирование с использованием существующей сети геодезического мониторинга (рис. 2). Аналогичная ситуация имеет место для серии землетрясений 2009–2010 гг. с $M = 5.5$ – 5.9 и землетрясения $M = 7.1$ в 2010 г. Таким образом, на всем протяжении многолетнего мониторинга сами фоновые вариации сдвиговых деформаций в поверхностных участках земной коры оказываются существенно меньше, чем на глубинах, где происходит основное количество событий.

Практически полное отсутствие сдвиговых деформаций, превышающих фоновые, вблизи поверхности Земли непосредственно в эпицентральных областях перед землетрясениями достаточно критично для инструментальных наблюдений, связанных с приповерхностными процессами [15]. Это касается в первую очередь прямых геодезических измерений на земной поверхности и деформационных наблюдений в неглубоких шахтах. Построение поля поверхностной деформации на основе спутниково-геодезических измерений с

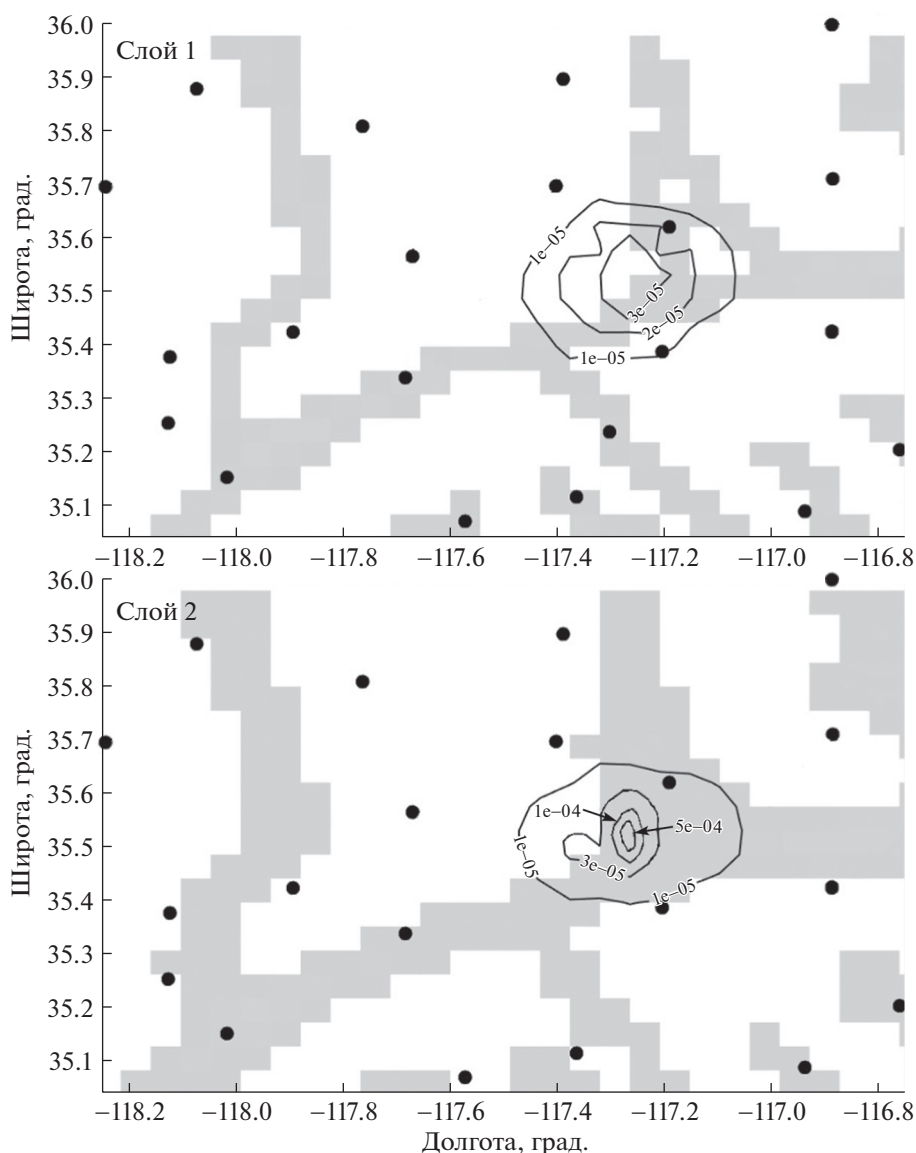


Рис. 2. Характерный уровень и пространственные размеры зон деформаций сдвига в двух верхних слоях земной коры в пределах эпицентральной зоны события 06.07.2019 по состоянию на 15.06.2016. Изолиниями показано распределение деформации сдвига в области повышенных значений (выше уровня 10^{-5}), связанной с зоной локальной сейсмической активности. Серым цветом показаны зоны поврежденности коры, связанные с разломной тектоникой, черными кружками – станции сети GPS. Можно видеть, что амплитуда деформации в слое 2 на порядок превышает таковую в первом (верхнем) слое; при этом малые пространственные размеры показанной зоны и скорость ее релаксации не позволяют с достаточной надежностью ее идентифицировать даже в случае наличия детальной сети GPS.

использованием ряда специальных методов позволяет выявить особенности тектонического строения исследуемого региона и протекающих в нем геодинамических процессов, включая общий характер движения плиты, деформирование внутриплитных областей и активизацию разломных зон [10, 13]. Тем не менее измеряемые в этом случае деформации могут быть связаны с процессами, не имеющими прямого отношения к разрушению земной коры перед землетрясением и имеющими иные пространственно-временные масштабы [9, 12].

Таким образом, использование поверхностных деформаций для целей краткосрочного прогнозирования землетрясений вряд ли может оказаться эффективным из-за их локальности (по сравнению с шагом сети геодезического мониторинга) и быстрой временной динамики. Следует отметить, что приведенные на иллюстрациях абсолютные значения деформаций могут быть смещенными в силу ряда недоучтенных в модели факторов, что может быть скорректировано путем калибровки, но не имеет принципиального значения, поскольку наиболее важную роль игра-

ет относительная динамика изменений напряженно-деформированного состояния, а не абсолютные значения тех или иных его параметров.

В свете сказанного, по опыту калифорнийских землетрясений представляется, что для краткосрочного прогнозирования предпочтительными могут быть методы, осуществляющие мониторинг свойств горных пород и процессов, связанных с деформациями на тех глубинах, где происходят сами события. Здесь могут оказаться эффективны методы глубинного сейсмического просвечивания, измерения акустических эмиссий, теплового режима и дегазации разломных зон. Детальный анализ возможностей подобных методов выходит за рамки данной работы. Существенной сложностью является то обстоятельство, что связь между глубинными деформационными процессами и измеряемыми величинами описывается некоторой функцией, неопределенность которой обусловлена отсутствием детальных модельных представлений и соответствующих количественных оценок. Так, например, во время эксперимента с использованием мощного промышленного взрыва на Амударьинском разломе [1] измерения количества выходящих газов в двух близкорасположенных скважинах оказались существенно различными, что отражает необычайно неоднородную структуру процессов деструкции и флюидодинамики в зоне сейсмического очага.

В этой связи следует отметить метод линейного мониторинга интегральных свойств разломов, связанных, скорее всего, с изменениями режима дегазации перед крупными землетрясениями, которые видны из космоса по изменениям характеристик земной поверхности в оптическом диапазоне. Метод успешно зарекомендовал себя в краткосрочном прогнозировании ряда землетрясений в Калифорнии [2].

И, наконец, в качестве перспективного направления в решении проблемы краткосрочного прогноза предлагаются прямые количественные расчеты пространственно-временного распределения глубинных деформаций и сопутствующих свойств геологической среды, связанных непосредственно с процессом разрушения земной коры перед землетрясениями. Такие расчеты могут проводиться с использованием детальных геомеханических моделей, в которых максимально подробно учитываются свойства земной коры и известные тектонические воздействия, влияние собственного веса, рельефа и теплового режима [3]. При этом зоны разломов рассматриваются как области с некоторой первичной поврежденностью, обуславливающей снижение прочностных характеристик среды. В роли входных экспериментальных данных выступает вся локальная текущая сейсмичность, которая и характеризует

процесс разрушения земной коры перед каждым крупным событием. При этом каждое землетрясение в зависимости от магнитуды рассматривается как новый дефект земной коры, приводящий к перераспределению напряженно деформированного состояния.

Применение данной технологии за последние 10 лет в Южной Калифорнии позволило выявить краткосрочные предвестники за первые недели и месяцы для землетрясений $M = 5.5-7.2$ на глубинах порядка 10 км в таких параметрах, как сдвиговые деформации, касательные напряжения и параметр D , отражающий степень близости среды к пределу прочности [7, 8].

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны Ю.В. Габсатарову за содержательные консультации в области применения спутниковых геодезических данных в задачах геодинамики.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в НИИ “АЭРОКОС-МОС” в рамках Государственного задания № АААА-А19-119081390037-2, а также в рамках Государственных заданий № АААА-А17-117061950051-8; № АААА-А17-117051110248-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белокопытов В.А., Гохберг М.Б., Гусева Т.В., Сквородкин Ю.П., Трапезников Ю.А. Влияние импульсного воздействия на деформационные процессы // Доклады АН СССР. 1985. Т. 280. № 3. С. 575-578.
2. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений на основе линейного анализа космических изображений // ДАН. 2005. Т. 402. № 1. С. 98-105.
3. Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Родкин М.В. Эволюция напряженного состояния Южной Калифорнии на основе геомеханической модели и текущей сейсмичности // Физика Земли. 2016. № 1. С. 120-132.
4. Бондур В.Г., Гохберг М.Б., Гарагаш И.А., Алексеев Д.А. Локальная аномалия напряженного состояния земной коры перед сильным землетрясением ($M = 7.1$) 05.07.2019 г. в районе г. Риджквест (Южная Калифорния) // ДАН. 2020. Т. 490. № 1. С. 17-21.
5. Короновский Н.В., Захаров В.С., Наймарк А.А. Краткосрочный прогноз землетрясений: реальность, научная перспектива или проект-фантом? // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2019. № 3. С. 3-12.
6. Argus D.F., Gordon R.G., Heflin M.B., Ma C., Eanes R.J., Willis P., Peltier W.R., Owen S.E. The Angular Velocities of the Plates and the Velocity of Earth's Centre from Space Geodesy // Geophysical Journal International. 2010. V. 180. P. 913-960.
7. Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B. The Dynamics of the Stress State in Southern California Based

- on the Geomechanical Model and Current Seismicity: Short-Term Earthquake Prediction // Russian Journal of Earth Sciences. 2017. V. 17. ES105.
8. *Bondur V.G., Gokhberg M.B., Garagash I.A., Alekseev D.A.* Revealing Short-term Precursors of the Strong $M > 7$ Earthquakes in Southern California From the Simulated Stress–strain State Patterns Exploiting Geomechanical Model and Seismic Catalog Data // *Frontiers in Earth Science*. 2020. 8:571700.
 9. *Cenni N., Viti M., Mantovani E.* Space Geodetic Data (GPS) and Earthquake Forecasting: Examples from the Italian Geodetic Network // *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata*. 2015. V. 56. № 2. P. 129–150.
 10. *Gabsatarov Yu.V.* Analysis of Deformation Processes in the Lithosphere from Geodetic Measurements Based on the Example of the San Andreas Fault // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2012. V. 3. № 3. P. 275–287.
 11. *Geller R.J.* Earthquake Prediction: A Critical Review // *Geophysical Journal International*. 1997. V. 131. P. 425–450.
 12. *Klein E., Bock Y., Xu X., Sandwell D. T., Golriz D., Fang P., Su L.* Transient Deformation in California from Two Decades of GPS Displacements: Implications for a Three-dimensional Kinematic Reference Frame // *J. Geophys. Research: Solid Earth*. 2019. V. 124. № 12. P. 12189–12223.
 13. *Shen Z.-K., Jackson D.D., Ge B.X.* Crustal Deformation Across and Beyond the Los Angeles Basin from Geodetic measurements // *J. Geophys. Research*. 1996. V. 101. No B12. P. 27957–27980.
 14. *Peresan A., Gorshkov A., Soloviev A., Panza G.F.* The Contribution of Pattern Recognition of Seismic and Morphostructural Data to Seismic Hazard Assessment. // *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata*. 2015. V. 56. № 2. P. 295–328.
 15. *Segall P.* Earthquake and Volcano Deformation. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2010. 456 p.

SOME CHALLENGES OF THE SHORT-TERM EARTHQUAKE FORECAST AND POSSIBLE SOLUTIONS

Academician of the RAS V. G. Bondur^a, M. B. Gokhberg^{a,b}, I. A. Garagash^{a,b}, and D. A. Alekseev^{a,b,c,d,#}

^a *Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring “AEROCOSMOS”, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^c *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow oblast, Russian Federation*

^d *P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: alexeevgeo@gmail.com*

We discuss the reasons behind the lack of efficiency of geodetic monitoring aimed at short-term forecasting of strong earthquakes. Based on the results from geomechanical monitoring in Southern California, it is shown that the strain observed at the earth’s surface is significantly lower compared to deeper layers of the earth’s crust (where most of seismic events occur), and does not exceed the background level. We discuss some approaches that allow deep deformation monitoring using detailed geomechanical models and remote sensing methods.

Keywords: earthquake forecast, geomechanical model, stress-strain state, deformation observations, earthquakes, Southern California